

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Venealan koulutusohjelma

Patrik Lindell

PUUKOMPOSIITTIRAKENTEIDEN SOVELTUVUUS VENETEOLLISUUTEEN

Opinnäytetyö 2011

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Venealan koulutusohjelma

PATRIK LINDELL

Insinööri

Työn ohjaaja

Toimeksiantaja

Toukokuu 2011

Avainsanat

Puukomposiittirakenteiden soveltuvuus veneteollisuuteen

43 sivua

Lehtori, Tapio Pilhjerta

KymiTechnology

kerrosrakenteet, komposiitit, puuveneet, puukomposiitit, veneenrakennus, venerakenteet, veneet

Puukomposiittirakenteiden käyttö on ollut veneteollisuudessa erittäin vähäistä. Erilaisten puukomposiittisten rakenteiden ja niiden mekaanisten ominaisuuksien avulla olisi kuitenkin mahdollista rakentaa täysin erilaisia ”puuveneitä” kuin perinteiset puuveneet.

Opinnäytetyössä selvitetään puukomposiittirakenteiden soveltuvuutta nykyaikaisen veneteollisuuden tarpeisiin. Työssä tutkitaan erilaisia puukomposiittirakenteiden valmistusmenetelmiä sekä rakenteita, ja tulosten avulla hahmotetaan puukomposiittirakentamisen mahdollisuuksia verrattuna niin lujitemuovi- kuin myös puuveneisiin.

Opinnäytetyö on toteutettu keräämällä tietoa aiheesta käsittelevästä kirjallisuudesta ja internetistä sekä omien kokemusten avulla. Opinnäytetyöstä saadun tiedon valossa olisi puukomposiittirakenteisilla veneillä mahdollista nostaa puuvenerakentamisen kannattavuutta saavutettujen ominaisuuksien ansiosta. Puukomposiittirakenteet eivät varsinaisesti kilpaile lujitemuovirakenteiden kanssa kilpaileva rakenne, mutta niiden avulla olisi mahdollista tuoda puurakenteisiin veneisiin vastaavia teknisiä ominaisuuksia kuin lujitemuoviveneissä on totuttu näkemään.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Boat Manufacturing

PATRIK LINDELL

Wood-composite constructions on boat manufacturing

Bachelor's Thesis

Supervisor

Tapio Pilhjerta, Lecturer

Commissioned by

KymiTechnology

May 2011

Keyword:

Wood-composite, wooden boat, hull structure, sandwich construction

Use of wood-composite constructions have been very marginal on boat manufacturing . Different kinds of wood-composite constructions with different kinds of mechanical properties may allow to build totally unlike woodenboats.

This thesis covers means to find out how wood-composite constructions fit to modern boat manufacturing. The goal of this thesis was to find out rational manufacturing methods and constructions to produce boats which can be competitiveness with its properties versus classic woodenboats and fibre reinforced plastic.

The material of the thesis was collected from various books, Internet and from personal experiences. This thesis shows that there might be a probability to raise profitability of manufacturing wooden boats with wood-composite constructions and building methods. These wood-composite constructions does not directly compete against fibre reinforced plastic constructions. But with wood-composite structure there is possibility to get mechanical properties of wooden boats closer to modern fibre reinforced plastic boat constructions.

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo	4
1 JOHDANTO	6
1.1 Taustaa	6
1.2 Työn tavoite	6
2 PUUKOMPOSIITIT	6
2.1 Mitä puukomposiitit ovat?	6
2.2 Puukomposiittien historia	7
2.3 Yleiset käyttösovellukset maailmalla	8
3 MATERIAALIT	8
3.1 Matriisimuovit	8
3.1.1 Polyesteri (UP)	9
3.1.2 Vinyyliesteri (VE)	9
3.1.3 Epoksi (EP)	10
3.1.4 Polyuretaani (PUR)	10
3.2 Lujitekuidut	11
3.2.1 Lasikuidut	11
3.2.2 Hiilikuidut	12
3.2.3 Aramidikuidut	12
3.3 Puumateriaalit	13
3.3.1 Puulajit käsittelemättöminä	14
3.3.2 Lämpökäsitelty puu materiaalina	15
3.3.3 Viilut	17
3.3.4 Vanerit	18
4 RAKENNUSMENETELMÄT	19
4.1 Ristiinlaminointi	20
4.1.1 Rakennusmuottimenetelmä	21
4.1.2 Rimakaarimenetelmä	21
4.2 Rimalaudoitusmenetelmä	22
4.3 Stich and Glue -menetelmä	23
4.4 Vaahtoydin-viilurakenne	24
4.5 Muita rakenteita	25
4.5.1 Paikallisesti lujitetut rakenteet	25
4.5.2 Sisustukselliset rakenteet	25

4.6	Lujitemuovirakenteet.....	26
4.6.1	Umpilaminaatti	26
4.6.2	Kerroslevyrakenteet.....	26
5	RAKENNUSMENETELMÄN EDUT JA HAITAT VENEENRAKENNUKSESSA	29
5.1	Sarjatuotantomahdollisuudet	29
5.2	Mekaaniset ominaisuudet	30
5.3	Esteettiset ominaisuudet	33
5.4	Rakenteiden korjausmenetelmät	34
5.4.1	Lujitemuoviveneiden korjaus.....	34
5.4.2	Puukomposiittirakenteiden korjaus.....	35
5.5	Kustannusvertailut.....	35
5.5.1	Umpilaminaatin ja rimaepoksin kustannusvertailu	36
5.5.2	Valmistusajat	37
6	Johtopäätökset	39
	LÄHDELUETTELO	41

1 JOHDANTO

1.1 Taustaa

Puu on ollut kautta aikojen veneenrakennuksen perusrakennusmateriaali. Viime vuosikymmeninä lujitemuoviveneet ovat kuitenkin vallanneet markkinoita materiaalien kehittymisen ja muovimateriaalien mahdollistaman teollisen tuotannon vuoksi. Puuveneet eivät silti ole täysin menettäneet markkinoitaan, mutta ovat nykyään selvästi jääneet lujitemuoviveneiden varjoon. Puuveneiden suurin ongelma verrattuna lujitemuoviveneisiin on tuotteen hinta, mikä johtuu pääasiassa suuresta työn määrästä, sekä lujitemuoviveneiden tarjoama huollon ja ylläpidon helppous verrattuna perinteisiin puuveneisiin. Perinteisesti rakennettujen puuveneiden uudelleen tuleminen teolliseen tuotantoon on lähes mahdotonta, mutta puuvenerakentamisen lähestyminen nykyaikaisten materiaalien ja rakennustekniikoiden kautta lujitemuoviveneiden ominaisuuksia voi avata puuvenemarkkinoillekin uusia ovia.

1.2 Työn tavoite

Työssä tutustutaan puuvenerakentamiseen, jossa käytettävät materiaalit ovat perinteiset massiivipuu, viilut ja vanerit sekä nykyaikaisista venetuotantotavoista tutut lujitteet ja eri kertamuovit. Opinnäytetyön tarkoituksena on pystyä hahmottamaan jo olemassa olevien kirjallisten tutkimusten kautta, milloin puukomposiittirakenteet olisivat varteenotettava rakennusmenetelmä ja/tai rakennemateriaali nykyajan veneteollisuuden tarpeisiin.

2 PUUKOMPOSIITIT

2.1 Mitä puukomposiitit ovat?

Komposiiteilla tarkoitetaan kahden tai useamman materiaalin yhdistelmää, jossa ainekset toimivat yhdessä, mutta eivät ole lienneet eivätkä sulautuneet toisiinsa (Suomisanakirja verkkosivut).

Edellä mainittu komposiittirakenteiden määritelmä on erittäin yksiselitteinen, mutta samalla harhaanjohtava. Tätä määritelmää kirjaimellisesti lukien on vaikea keksiä yhtäkään rakennetta, joka ei olisi komposiittirakenne. Esimerkiksi kahdesta laudasta yhteen naulaamalla tehty rakenne olisi kyseisen määritelmän mukaan komposiittirakenne.

Perinteistä limisaumarakenteista soutuvenettäkin voisi siis kutsua komposiittirakenteiseksi, mutta opinnäytetyössäni tarkoitan puukomposiitilla rakennetta, jossa on matriisimuovilla yhdistetty rakenteeksi joko puu+lujitekuitua tai vaihtoehtoisesti puu+puurakennetta (esim. rima + viilu/vaneri).

2.2 Puukomposiittien historia

Epoksikemian historia alkoi luultavasti 1900-luvun alussa, kun venäläinen kemisti Prileschajev keksi, että olefiinit reagoivat peroksibentsoehapon kanssa muodostaen epoksieja. 1930-luvun puolivälissä saksalainen P. Schlack haki patenttia korkean molekyylipainon omaavien polyamiinien valmistustavalle, jossa amiinit reagoivat useampaa kuin yhtä epoksidiyhmää sisältävien epoksidiyhdisteiden kanssa. Patenttia kuvailtiin epoksidiyhdistereaktioksi, jossa epikloorihydriini reagoi bisfenoli-A:n kanssa. Nykyään tuntemamme epoksikemian, jota käytetään merenkulku- ja teollisuussuojauksessa, keksivät samanaikaisesti sveitsiläinen P. Castan ja yhdysvaltalainen S. Greenlee. Molemmat kemistit hakivat useita patenteja 1930-luvun lopulla. Ciba toi ensimmäiset epoksihartsityypit markkinoille vuonna 1946. (Hempel Oy:n verkkosivut)

Puukomposiittien historian voidaan katsoa syntyneen epoksien syntymisen seurauksena, koska puurakenteiden huonot ominaisuudet johtuvat yleisesti puun kyvystä imeä kosteutta ympäristöstään. Epoksien myötä puurakenteet pystyttiin suojaamaan kosteusmuutoksilta entistä paremmin ja epokseilla saavutettiin myös huomattavasti paremmat liimausominaisuudet kuin aikaisemmin käytössä olleilla liimoilla / matriisimuoveilla.

2.3 Yleiset käyttösovellukset maailmalla

Puukomposiittirakenteiden käyttö maailmalla on tänä päivänä yleisintä pienveneteollisuudessa, jossa sen voidaan katsoa olevan perinteiseen puuvenerakentamiseen rinnastettavaa piensarjatuotantoa, mutta myös esimerkiksi tuuliturbiinien lapoja on valmistettu ristiinlaminoimalla ohuita vanerikerroksia toisiinsa. Huonekaluteollisuudessa käytetyt viilutetut rakenteet voidaan myös luokitella puukomposiiteiksi.

Puukomposiittirakenteilla on kuitenkin potentiaalia muihinkin sovelluksiin, kuten Coventryn Yliopistossa tapahtuva tutkimus osoittaa. Siellä tutkitaan puurakenteiden lujittamista sekä puutavaran liittämistä toisiinsa epoksi-lasikuitulaminaatilla korvaamaan perinteiset ruuvit ja naulat. (Claisse Peter, verkkosivut)



Kuva 1. Puutavaran liittäminen lasikuidulla ja epoksilla (Claisse Peter, verkkosivut)

3 MATERIAALIT

3.1 Matriisimuovit

Matriisimuoveina käytetään yleisimmin kertamuoveja, jotka kovettuvat nestemäisestä hartsista kiinteäksi aineeksi silloittumis- eli kovettumisreaktiossa. Kovettumisen jälkeen kertamuoveja ei voi enää lämmön avulla muovata uudelleen. Yleensä

kertamuoveja lujitetaan kuiduilla ja täyteaineilla, koska lujittamattoman kertamuovin jäykkyys ja lujuus eivät ole riittäviä teknisiin ja rakenteellisiin sovellutuksiin. Veneteollisuuden kannalta lujitteilla on suurempi merkitys kuin täyteaineilla. Lujitteet kantavat suurimman osan rakenteisiin kohdistuneista kuormista ja matriisimuovin tehtävä on liimata lujitteet toisiinsa ja näin ohjata rasitukset lujitteiden kannettaviksi. Valmistusmenetelmistä riippuen lujitepitoisuudet ovat yleensä noin 30 - 70 p-%. (Saarela 2007, 35.)

3.1.1 Polyesteri (UP)

Polyesterihartsit ovat tyydyttymättömän polyesterin ja styreenin seos, joka kovettuu komponenttien reagoidessa keskenään silloittumisreaktiossa. Tyydyttymättömät polyesterit valmistetaan kondensoimalla tyydyttymättömiä dikarboksyylihappoa tai sen anhydridiä ja diolia eli glykolia. Polyesterihartsit ovat yleisimmin käytettyjä hartseja lujitemuoviteollisuudessa. Polyesterihartseja on kahta eri laatua, isoftaali- ja ortoftaali-polyesterit. Ortopolyesteri on yleisesti käytetty hyvän hinta-laatusuhteensa vuoksi. Isoftaali-polyesterin lämmönkestävyys, kemialliset ja mekaaniset ominaisuudet ovat paremmat. Polyesterihartsin kanssa työskenneltäessä työturvallisuuden kannalta vaarallisin komponentti on kovettumisreaktiossa käytettävät kovettajat, jotka ovat vahvasti syövyttäviä peroksideoita. Yleisimmin käytetty kovete on MEKP (metyylietyyliketoniperoksidi). (Saarela 2007, 37 - 43.)

3.1.2 Vinyyliesteri (VE)

Vinyyliesterihartsit ovat ominaisuuksiltaan ja käyttötavoiltaan polyesterihartsien sukulaisia, mutta erilaisia kemialliselta rakenteeltaan. Yleisin vinyyliesteri koostuu bisfenoli-A:n ja epikloorihydridin reaktiotuotteesta eli epoksihartseista, joka on esteröity metakryylihapon kanssa. Tämä oligomeeri liuotetaan styreeniin kuten polyesterihartsit. Vinyyliesterien kemiallisesta luonteesta seuraa, että ne muistuttavat työstöominaisuuksiltaan polyesterihartseja ja monilta loppuominaisuuksiltaan epoksihartseja. Huomattavasti polyesterihartseja kalliimmalla vinyyliesterihartsilla on käsiteltävistä kertamuoveista selvästi paras kemiallinen kestävyys, minkä vuoksi sitä käytetäänkin kemiallista kestävyyttä vaativissa kohteissa, kuten säiliöissä, tankeissa

jne. Mekaaniselta kannalta tutkittaessa vinyyliesterin etuihin kuuluu myös sitkeys. Vinyyliesterin tartunta- ja kostutusominaisuudet ovat kaikkiin lujitteisiin hyvät. (Saarela 2007, 44-45.)

3.1.3 Epoksi (EP)

Epoksihartseilla tarkoitetaan oligomeerejä tai polymeerejä, jotka sisältävät vähintään kaksi epoksiryhmää. Yleisin epoksihartsi valmistetaan epikloorihydridin reaktiolla bisfenoli-A:n kanssa. Epoksihartsit kovetetaan polyesteri- ja vinyyliesterihartseista poiketen reaktiivisella kovetteella. Epoksikovete muodostaa myös suuren osan kovetetun hartsin verkkorakenteesta, jolloin lopputuotteen ominaisuudetkin riippuvat merkittävästi myös kovetteesta. Epoksien kovettumisreaktiossa ei vapaudu haihtuvia liuottimia. Epoksit aiheuttavat helposti yliherkkyyttä joutuessaan kosketuksiin ihon ja limakalvojen kautta. Epoksimuovien monipuolisuudesta seuraa, että kovettettujen epoksien ominaisuuksia voidaan vaihdella hyvin laajoissa rajoissa. (Saarela 2007, 45-48.)

Epoksit tarttuvat hyvin moniin pintoihin ja niiden mekaaniset ominaisuudet ovat erinomaiset. Erikoiskuituja (hiili- ja aramidikuidut) käytettäessä epoksi on käytännössä ainoa varteen otettava matriisimuovi, jotta lujitteiden ominaisuudet saadaan paremmin hyödynnettyä. Aramidikuidun ollessa kyseessä muilla hartseilla on vaikea saada tarpeeksi hyvä tartunta kuituun. Epokseja käytetäänkin yleisesti sovellutuksissa, joissa tarvitaan hyviä tartunta- ja lujuusominaisuuksia. (Saarela 2007)

3.1.4 Polyuretaani (PUR)

Polyuretaaniksi (PUR) kutsutaan polymeerejä, jotka syntyvät, kun di-isosyanaatti reagoi eri yhdisteiden kanssa muodostaen uretaaniryhmiä. Polyuretaaneja on lukuisia erilaisia. Tärkeimmät perustuvat di-isosyanaattien ja polyolien väliseen reaktioon. Polyuretaanien monipuolinen kemia tarjoaa mahdollisuuksia niiden valmistamiseen, minkä vuoksi polyuretaanien ominaisuuksia voidaan säätää hyvin laajalla alueella. Tärkeimpiä polyuretaanin etuja ovat alhainen viskositeetti, alhainen kovetuslämpötila (50 - 70 °C), tarvittaessa erittäin nopea kovetusreaktio ja alhainen hinta. Toisaalta

polyuretaanin alhaiset mekaaniset ominaisuudet ja huono lämmönkesto ovat heikkoja vertailtaessa muihin kertamuoveihin. Isosyanaatit ovat lisäksi toksisia. Isosyanaattia vapautuu myös kovetetun hartsin mekaanisessa työstössä. Polyuretaanilla on lukuisia erityyisiä käyttökohteita johtuen muovin monipuolisuudesta. Pääasiallinen käyttökohde on sovellutuksissa, joissa ei käytetä lujitteita. (Saarela 2007, 50-51.)

3.2 Lujitekuidut

Lujitteita käytetään parantamaan muovien ominaisuuksia. Lujitteet kantavat komposiittiin kohdistuvat kuormitukset. Matriisimuovin tarkoituksena on sitoa lujitteet toisiinsa, suojata niitä ja siirtää kuormitukset niiden kannettaviksi. Vaikka muovien joitakin ominaisuuksia voidaan parantaa eri täyte- ja lisäaineilla, on muovien varsinaisiksi lujitteiksi katsottava vain tätä varten valmistetut lujitekuidut. Lujitetuissa komposiittirakenteissa tulee ottaa huomioon lujitekuidun ja matriisimuovin keskinäiset ominaisuudet, sillä komposiittirakenteet ovat yhtä heikkoja kuin niiden heikoin komponenttikin on. (Saarela 2007, 74.)

Puukomposiittirakenteissa käytetyt lujitekuidut ovat pääosin lasikuitua ja joissakin erityisiä ominaisuuksia tarvitsevilla kohteilla aramidi- ja hiilikuitua. Aramidi- ja hiilikuitujen käytön rakenteessa tulee olla erityisen hyvin perusteltua niiden korkean hinnan takia. Käytännössä niiden käyttö puukomposiittirakenteissa on erityisen vähäistä ja ainoat todelliset käyttökohteet ovat rakenteessa olevat kohdat, jotka mahdollisesti tarvitsevat erityisiä mekaanisia lujuusominaisuuksia (esim. aramidikuituiset ”kaaret”, hiilikuiturovinki mastossa jne.).

3.2.1 Lasikuidut

Lasikuidut ovat kaikkein yleisimmin käytettyjä lujitteita komposiittirakenteissa. Eri lasikuitutyyppejä on neljä erilaista: A-, C-, E- ja S-lasikuidut. Ehdottomasti yleisin näistä on E-lasi (Electricial glass), jonka sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet sekä kemiallinen kestävyys ovat hyvät, sillä lasi sisältää alkaleja ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) alle 1 %. Tässä työssä käsiteltäessä lasikuitua keskitytäänkin vain ja ainoastaan E-lasikuitutyyppiin. Lasikuidut ovat yleisimmin käytettyjä lujitteita puu-komposiittirakenteissa edullisuutensa ja työstettävyytensä johdosta. Käytettäessä epoksia matriisimuovina

lasikuidun kanssa on kyseisellä laminaatilla yksi erinomainen ominaisuus: epoksilla laminoitu lasikuitukudos kyllästyy lähes täysin läpinäkyväksi (vrt. lakkapinta). (Saarela 2007, 74 - 75.)

3.2.2 Hiilikuidut

Hiilikuiduilla tarkoitetaan kuituja, joiden hiilipitoisuus on korkea, tavallisesti noin 95-99 p-%, ja joille on ominaista korkea kimmomoduuli ja suuri lujuus ja jotka ominaisuuksiensa puolesta soveltuvat hyvin muovien lujittamiseen. Hiilikuituja valmistetaan useita eri laatuja eri ominaisuuksilla: SM- (Standard Modulus), HT- (High Tenacity), IM- (Intermediate Modulus), HM- ja UHM-kuituja (Ultra High Modulus). Hiilikuitukomposiiteissa oikeastaan ainoa käyttöön soveltuva matriisimuovi on epoksi, jolla saadaan kuiduista parhaat ominaisuudet käyttöön. Muita matriisimuoveja käytettäessä tulevat muovien mekaanisten ominaisuuksien rajat aikaisemmin vastaan. (Saarela 2007, 80 - 88.)

Hiilikuiduille on tyypillistä suuri lujuus ja jäykkyys suhteutettuna keveyteen. Veto-, taivutus- ja puristuslujuudet ovat hiilikuiduilla erinomaiset. Hiilikuitujen ominaisuudet ovat hyödynnettävissä tehokkaasti komposiittirakenteissa. Hiilikuitulaminaatit ovat täysin kimmoisia murtorajaan asti. Hiilikuitujen mekaaniset ominaisuudet ovat hyvät kuitusuunnassa, mutta kuitusuuntaa vastaan poikittaiset ominaisuudet ovat huomattavasti heikommat ja pääosin matriisimuovin ominaisuuksista riippuvaiset. Hiilikuitulaminaattien kerrosten väliset leikkauslujuudet ovat erinomaiset muihin kuituihin verrattuna. (Saarela 2007, 80 - 88.)

3.2.3 Aramidikuidut

Aramidikuidut ovat yleisnimi aromaattisille polyamidikuiduille. Muihin kuituihin verrattuna aramidikuiduilla on huomattavasti suurempi vetomurtolujuus ja kimmomoduuli ja merkittävästi pienempi murtovenymä. Aramidikuitujen huonoina ominaisuuksina voidaan pitää niiden alhaista puristuslujuutta ja huonoa tartuntaa matriisimuoveihin, jotka ovatkin käyttöä rajoittavia tekijöitä. Näistä johtuen aramidikuituja yleisesti käytetäänkin yhdessä muiden kuitujen kanssa. Aramidikuidut ovat myös luontaisesti palamattomia ja kestävät korkeita lämpötiloja sekä orgaanisia

liuotteita että poltto- ja voiteluaineita. (Saarela 2007, 89.)

Aramidikuitujen käyttö on perusteltua sovellutuksissa, joissa vaaditaan keveyttä ja samalla suurta vetolujuutta, jäykkyyttä sekä iskulujuutta ja –sitkeyttä. Suurin osa aramidikuitujen käytöstä kohdistuu lentokone-, avaruus- ja veneteollisuuden sekä urheilu- ja vapaa-ajan välineiden valmistukseen. Käytön kannalta merkittäviä sovellutuksia ovat rakenteet, joissa tarvitaan luodeilta, räjähteiltä, sirpaleilta ja iskuilta suojautumista. Aramidikuitun työstössä on otettava huomioon kuidun sitkeys, mikä asettaa suuremmat vaatimukset käytettävälle työkaluille ja –menetelmille. Aramidikuitujen ja näillä lujitettujen laminaattien leikkaukseen ja työstöön on lähes jokaisella työkaluvalmistajalla erikoistyökalut, joiden käyttöä suositellaan. (Saarela 2007, 89 - 92.)

3.3 Puumateriaalit

Puulla on monia etuja veneenrakennusmateriaalina. On luultavasti helpointa, halvinta ja tyydyttävintä rakentaa vene puusta kuin mistään muusta materiaalista. Puuta on suhteellisen helppo työstää ja kaikilla ihmisillä on jonkinlainen käsitys puusta materiaalina. Kaikkein tärkeintä on, että puulla on fyysisiä ominaisuuksia jotka tekevät siitä ideaalin veneenrakennusmateriaalin. Vaikka puulla on monia etuja muihin materiaaleihin nähden, on sillä myös haittansa. Puu voi lahota ja se imee itseensä vettä ympäristöstään. Tästä seuraa, että puu rakennemateriaalina menettää mekaanisia ominaisuuksiaan, kun puun kosteus on noussut liian suureksi. Puurakenteet veneessä vaativat rungon ulkopuolelle ”suojaavan kerroksen”, jonka tulee kestää vedestä aiheutuvat paineet. Puurakennetta suojaava kerros voi olla osana rakennetta, voimia kantava (esim. lujite-hartsiyhdistelmä) tai kerros voi olla pelkästään pintakäsittely (esim. lakat, maalit, jne.). (Gougeons 1985, 25.)

Veneiden täytyy myös kestää rantautumisesta aiheutuvat hetkittäiset suuretkin rasitukset särkymättä. Haastavinta materiaalin valinnan kannalta on se, että rakenteiden pitäisi kestää kaikki nämä rasitukset vuosia. Veneissä olisi suotavaa käyttää materiaaleja, jotka ovat vahvoja ja kevyitä. Rakenteen tulisi olla jäykkä ja pystyä kantamaan muotonsa vääntymättä kuormituksen alla. Mitä kevyempi ja jäykempi veneen runko on, sitä suorituskykyisempi ja luotettavampi vene on. Mitä

kevyemmäksi runko pystytään rakentamaan, sitä nopeammin se liikkuu määritellyllä teholla, ja mitä jäykempi runko on, sitä paremmin se säilyttää muotonsa rasituksessa. Jotta puun parhaita ominaisuuksia pystyttäisiin hyödyntämään parhaiten, tulisi puun olla mahdollisimman kuivaa rakennusvaiheessa ja pitää sama kosteusprosentti käytönkin aikana. Tämä varmistaisi, että puun mekaaniset ominaisuudet säilyisivät käytöstä aiheutuvasta rasituksesta huolimatta. (Gougeons 1985, 25.)

Tähän tilanteeseen pääseminen edellyttää puun koteloimista kauttaaltaan. Tietäntyylisissä rakentamistavoissa (esim. rimarakenteiset, strip plank method) suuri määrä rimoja muodostaa rakenteen yhdessä. Tavoitteena on tutkia erilaisten puukomposiittirakenteiden ominaisuuksia haluttujen mekaanisten ominaisuuksien löytämiseksi. Tässä tutkimuksessa keskitytään vain ”koteloituihin” puu-komposiittirakenteisiin, jotka antavat mahdollisuuden käyttää myös huonommin kosteutta ja kulutusta kestäviä puulajeja suojaavan ulkokuoren takia.

3.3.1 Puulajit käsittelemättöminä

Keräsin tietoja eri puulajien mekaanisista ominaisuuksista TheWoodExplorerin internet-sivustolta, jossa on erittäin kattava tarjonta eri puulajien ominaisuuksista sekä kasvupaikoista. Otin tutkittavaksi niin perinteisiä veneenrakennukseen käytettyjä puulajeja (mahonki sekä metsämänty) kuin myös harvinaisempia puita veneenrakennuksen kannalta (leppä). Veneenrakennuksen kannalta oleelliset ominaisuudet ovat listattuna taulukossa 1. Kuten taulukosta käy ilmi, on metsäkuusi vertailussa mukana olevista lajeista kevyin puulaji. Puukomposiittirakenteissa tärkeä materiaalin ominaisuus, jäykkyys, on myös kuusella kilpailukykyinen muiden puiden kanssa, mutta toisaalta jotkut muut ominaisuudet ovat hiukan huonommat.

Puukomposiittirakenteiden ja perinteisen puuvenerakenteen erona voidaan pitää myös sitä, että puukomposiittirakenteissa rakenne ei koskaan ole vain yhden rakennekerroksen varassa, vaan yleisesti esimerkiksi ytimeltään rimarakenteisesti rakennettu runko on vielä vahvistettu joko lujitekuidulla, vanerilla tai viilulla. Tästä johtuen rakenteen mekaaniset ominaisuudet, kuten aina komposiittirakenteissa,

koostuvat usean eri materiaalin ja rakennekerroksen yhteisistä ominaisuuksista, ja näin ollen rakenteen kaikissa osissa ei välttämättä ole tarpeellista käyttää vain laadultaan parasta raaka-ainetta. Etenkin kappaleissa, jotka maalataan tai vaihtoehtoisesti jäykistetään viilukerroksella, saavutetaan vastaava ulkonäkö myös käytettäessä esteettisesti huonompilaatuisia materiaaleja.

Taulukko 1. Puulajien ominaisuuksia

		Metsämänty	Metsäkuusi	Karibian mahonki	Tervaleppä	Sitkakuusi
Taivutuslujuus	kg/cm ²	849	641	950	731	703
Tiheys	kg/m ³	512	448	657	528	432
Kovuus	kg	246	171	449	293	189
Leikkaus lujuus	kg/cm ²	100	80	139	110	74
Jäykkyys	1000 kg/cm ²	102	98	90	93	111
Säteittäinen kutistuminen	%	3	2	3	5	3
Tangentiaalinen kutistuminen	%	7	7	5	9	7

(The Woodexplorerin verkkosivut)

3.3.2 Lämpökäsitelty puu materiaalina

Lämpökäsitellyn puun käyttöönotto on tavallaan paluuta vanhaan, sillä puupinnan hiiltäminen on ollut käytössä jo sukupolvien ajan. Jo muinaiset esi-isämme polttivat aidanseipäiden päät karrelle, jotta ne eivät lahoaisi joutuessaan kosketuksiin maan kanssa. Tätä kansan keskuudessa elänyttä tietämystä on tutkittu jo vuosikymmeniä. Tuloksena on uusi ainutlaatuinen menetelmä käsitellä puuta ja parantaa sen ominaisuuksia mitä moninaisimpiin sovellutuksiin sopivaksi. Puun värimuutokset lämpökäsittelyssä luovat edellytykset korvata tuontipuita kotimaisilla vaaleilla puulajeilla. Näin voidaan vähentää esimerkiksi uhanalaisten trooppisten puulajien käyttöä. Ekologisen edun puusepänteollisuus voi hyödyntää markkinoinnissa. Myös metsien monipuolisuuden edistäminen ja toisarvoisten kotimaisten puulajien käytön lisääminen saa lämpökäsittelyn myötä uusia mahdollisuuksia. (Elolinja 2002, 9-10.)

Lämpökäsittelyssä puun väri tummuu. Sydän- ja pintapuun välinen väriero pienenee ja joillakin puulajeilla se katoaa lähes kokonaan. Värien tummuminen on sitä voimakkaampaa, mitä korkeampi on lämpötila ja mitä pidempi on käsittelyaika. Esimerkiksi koivun ja haavan luontaisia ja keinokuivauksen aiheuttamia värivikoja voidaan tiettyyn rajaan asti peittää lämpökäsittelyn avulla. Lämpökäsittelyssä puun paino vähenee. Se johtuu puun pääkomponenttien, selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin kemiallisista muutoksista sekä uuteaineiden häviämisestä. Puussa tapahtuva painohäviö riippuu käsittelylämpötilasta ja ajasta. Lisäksi painohäviön suuruuteen vaikuttavat ympäröivät olosuhteet ja käsiteltävän puun koko. Lämpökäsittelyssä puun kuivumisesta tapahtuva painon väheneminen ei kuulu edellä esitetyn painohäviön piiriin. (Elolinja 2002, 26-28.)

Puun lujuusominaisuudet riippuvat siihen kohdistuneen kuorman suunnasta. Puulajien ominaisuudet poikkeavat niiden rakenteen erilaisuuden takia, joten lujuusominaisuuksien tarkka määrittäminen on vaikeaa. Saman puulajin sisälläkin ominaisuudet vaihtelevat paljon. Puun lujuusominaisuuksiin vaikuttavat olennaisesti myös kasvupaikka, ilmasto, ravinteet ja kasvuolot. Myös puun iällä on merkitystä, samoin sillä, mistä osasta runkoa puukappale on otettu. Erityisesti on huomioitava lujuuden nopea lisääntyminen puun kosteuden pudotessa niin, että lujuus on 5 %:n kosteudessa jokseenkin kaksinkertainen 25 % vettä sisältävään puuhun verrattuna. (Elolinja 2002, 28.)

Lämpökäsittelyllä on vaikutusta puun lujuusominaisuuksiin. Muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta lujuudet heikkenevät lämpökäsittelyssä. Eniten lämpökäsittely heikentää puun halkaisu- ja vetolujuutta. Lämpökäsittely heikentää myös puun taivutuslujuutta, mutta heikkeneminen ei ole niin voimakasta kuin halkaisu- ja vetolujuudessa. Lujuusominaisuus, johon puun lämpökäsittely vaikuttaa positiivisesti, on puristuslujuus. Kosteuden vaikutus kovuuteen on vähintään yhtä jyrkkä kuin sen vaikutus puristuslujuuteen. Kosteuden pieneneminen yli puunsyitten kyllästymispisteen olevalta alueelta vedettömään tilaan nostaa pääkovuuden noin kolminkertaiseksi ja vastaavasti sivukovuuden noin kaksinkertaiseksi. Elolinjan suorittamat testit taivutuslujuuden määrittelemiseksi osoittavat, että lämpökäsitelty puu halkesi oksankohdalta äkillisemmin kuin normaalisahatavara. Oksaisuus siis

heikentää huomattavasti puun taivutuslujuutta. Lämpökäsitellyn puun murtuma on myös rajumpaa ja laajempaa. (Elolinja 2002, 28 – 31).

Lämpökäsitelty puumateriaali on puukomposiittirakenteiden kannalta erittäin mielenkiintoinen, koska puukomposiittirakenteissa rakenteessa oleva puu koteloidaan kauttaaltaan kosteudelta suojaan, jolloin rakenteissa on mahdollista käyttää myös puulajeja, joita ei perinteisesti ole venemateriaaliksi mielletty (esim. koivu). Koteloinnin avulla pystytään saavuttamaan veneelle arvokkaampi ulkonäkö halvemmilla materiaaleilla.

3.3.3 Viilut

Viilu on ohut puusta leikattu (höylätty) tai sorvattu levymäinen tuote. Yleisimmin viilutuksessa käytetään n. 0,4 - 0,6 mm paksuja viiluja. Viilutuksella tarkoitetaan puuviilun liimaamista levymäisen kappaleen pinnalle. Yleisimmin viilutetaan lastulevyä ja MDF-levyä. Viilut valmistetaan yleensä korkealaatuisesta ja arvokkaasta puuraaka-aineesta. Leikattu viilu valmistetaan höyläämällä viilulastuja tukista, jolloin viilun syykuvio säilyy luonnollisena. Leikkaamalla saadaan aikaiseksi ohuita viiluja, jolloin raaka-ainehävikki on pieni. Viilun pinnalle ei myöskään synny jatkokäsittelyä vaikeuttavia halkeamia, kuten sorvaamalla työstetyssä viilussa. Leikatun viilun valmistus on kalliimpaa kuin sorvatun, mutta sen ominaisuudet ovat monessa suhteessa parempia. Arvokkaista puulajeista leikattua viilua käytetään pintamateriaalina mm. kalusteissa, jalopuuovissa ja sisustuslevyissä ja -paneeleissa. Syntyvän viilun ulkonäkö riippuu leikkaussuunnasta. Säteen suunnassa leikattu viilu on ulkonäöltään tasaisempaa kuin tangentin suuntaan leikattu. (PuuProffa-verkkosivut)

Puukomposiittirakenteissa viilutuksella on kaksikin oleellista tehtävää. Toinen on, että viilutuksella voidaan saada rakenteelle jalopuinen ulkonäkö vain muutaman millimetrin paksuisella viilulla. Tämän etuna voidaan pitää sitä, että itse rakennemateriaalina pystytään käyttämään lähestulkoon mitä tahansa materiaalia, joilla rakenteen tarvittavat mekaaniset ominaisuudet saavutetaan. Siksi pienet esteettiset virheet rakennemateriaalissa eivät ole este sen käytölle toisin kuin

perinteisessä puuvenerakentamisessa. Näin menetellen on mahdollista käyttää huomattavastikin halvempia materiaaleja rakenteessa ja silti saavuttaa veneelle vastaava laadukas ulkonäkö.

Viilutuksella voi olla myös mekaanisia ominaisuuksia parantava merkitys rakenteelle. Esimerkiksi rimarakenteisen veneen viilutus jäykistää rakennetta jopa enemmän kuin lujitekuitukudoksen käyttö. Tätä menetelmää voidaan silti käyttää vain pienissä venetyypeissä ja kanooteissa tarvittavien rakenteen lujuuksien saavuttamiseksi.

3.3.4 Vanerit

Vanereissa sorvatut viilut liimataan syysuunnaltaan ristikkäin. Ristiinliimaus estää kosteusvaihteluiden aiheuttamia mittojen muutoksia eli puun kosteuselämistä levyn tason suunnassa. Liimana käytetään usein fenoliformaldehydihartsia, joka kestää vaativiakin olosuhteita. Näin liimatun vanerin reunoissa näkyy ohuet punaruskeat liimasaumat. Väritöntä liimaa käytetään kohteissa, joissa liimasauman ei haluta yhtään erottuvan. Tällainen vaneri on kalliimpaa, mutta se ei kestä hankalia kosteusolosuhteita. Vaneri onkin puulevyistä tässä suhteessa kestävin (EN-314-2:luokka 3 exterior). Lujuusominaisuuksien ja puumaisen ulkonäön vuoksi vanerin käyttöalue on laaja ja erilaiset pinnoitteet lisäävät sen käyttökelpoisuutta. Eri käyttötarkoituksiin valmistetaan pintakäsiteltyjä tai pinnoitettuja vanerituotteita. Pinnoittamalla voidaan parantaa vanerin kulutus-, iskun-, sään- ja kemikaalinkestävyyttä sekä kitkaominaisuuksia. Pinnoitetut vanerit reunasuojataan yleensä pinnoitteen värisellä reunamaalilla. (PuuProffa-verkkosivut)

Vaneri on materiaalina erittäin käytetty puukomposiittirakenteisissa veneissä. Sillä saavutetaan erittäin jäykät rakenteet ristiin laminoiduissa rakenteissa. Isoimmissa rimarakenteisissa veneissä rakenteen pintaan laminoidulla vanerikerroksella saavutetaan erittäin jäykkä rakenne.

Vanereilla on useita hyviä ominaisuuksia sahattuun puutavaraan verrattuna.

- Vaneri on painoonsa nähden erittäin lujaa.
- Pituus- ja leveyssuuntainen kosteuseläminen on vähäistä (paksuussuunnassa kuten puulla).
- Liimasauma (fenoliformaldehydihartsi) kestää vaikeissakin olosuhteissa.
- Ei halkeile kuten sahatavara, ruuvikiinnitys reuna-alueilta mahdollista.
- Puun alkuperäiset hyvät ominaisuudet ovat tallella.

4 RAKENNUSMENETELMÄT

Tässä työssä käsiteltävät rakennusmenetelmät keskittyvät sekä puun ja matriisimuovin (liiman) tuomaan rakenteeseen että puun, matriisimuovin ja lujitekuitujen yhdistelmiin. Kyseisissä rakennusmenetelmissä käytetyt matriisimuovit ovat kertamuoveja, yleisimmin epoksihartseja. Näillä matriisimuoveilla sidotaan rakenteeseen kuuluvat komponentit yhteen haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Matriisien tarkoitus on myös saada aikaan puun pinnalle vedenpitävä kerros (kotelo), jonka ansiosta rakennemateriaalina käytetyn puun kosteuden pitäisi pysyä vakiona käytössä ja näin estää puun lahoamista sekä lujuusominaisuuksien heikentymistä. Juuri matriisimuovien kehittyminen, etenkin epoksien yleistyminen, on antanut uusia mahdollisuuksia puu-komposiittirakenteiden kehittämiseen ja käytön yleistymiseen.

Yhteistä mainitsemilleni rakennusmenetelmille on menetelmien yksinkertaisuus. Koska rakenteen ydin rakentuu puun ympärille, puun ollessa keskeinen työstettävä materiaali, lähes kaikki tarvittavat työkalut ovat puuntyöstöön tarkoitettuja. Puu on materiaalina erittäin pehmeää ja helposti työstettävää, mistä johtuen puun työstämiseen tarvittavat työkalut eivät vaadi työkalujen leikkaavilta teriltä erityisiä lujuusominaisuuksia ja ne ovat näin huomattavasti halvempia ja helpommin saatavissa kuin tietyt lujitekuitutyöskentelyyn tarkoitetut timanttiterillä varustetut työkalut. Todellisuudessa sekä puu- että lujitemuoviveneiteollisuudessa käytettävät puuntyöstökoneet ovat samat riippumatta rungon rakennemateriaalista, mikä johtuu puusisustuksen yleisyydestä lujitemuoviveneissä.

Huomioon otettava asia on ehdottomasti myös työhygieniä. Puupölyaltistumisen tiedetään lisäävän tulehduksellisia hengityselinten sairauksia, myös astmaa. Tyypillisiä puupölyaltistumiseen liittyviä oireita ovat pitkittynyt nuha ja yskä, nenän toiminnan muutokset, keuhkoäritys ja hengenahdistus. Vuosikymmenten altistumiseen liittyy myös suurentunut riski sairastua harvinaiseen nenän ja nenän sivuonteloiden syöpään. (Poliklinikka.fi-verkkosivut)

Jokaisessa veneenrakennusmenetelmässä työntekijä altistuu jossain määrin käytettävän rakennemateriaalin pölytyypille. Sillä osin puun käyttäminen rakennemateriaalina ei juurikaan eroa työhygienialtaan muista menetelmistä. Toisaalta tiettyjen lujitemuovituotannossa käytettyjen kemikaalien (kovettimet, kiihdyttimet, liuottimet jne.) käyttö on huomattavasti vähäisempää puuveneteollisuudessa, ja tästä johtuen kyseisille kemikaaleille tapahtuva altistuminenkin vähäisempää.

4.1 Ristiinlaminointi

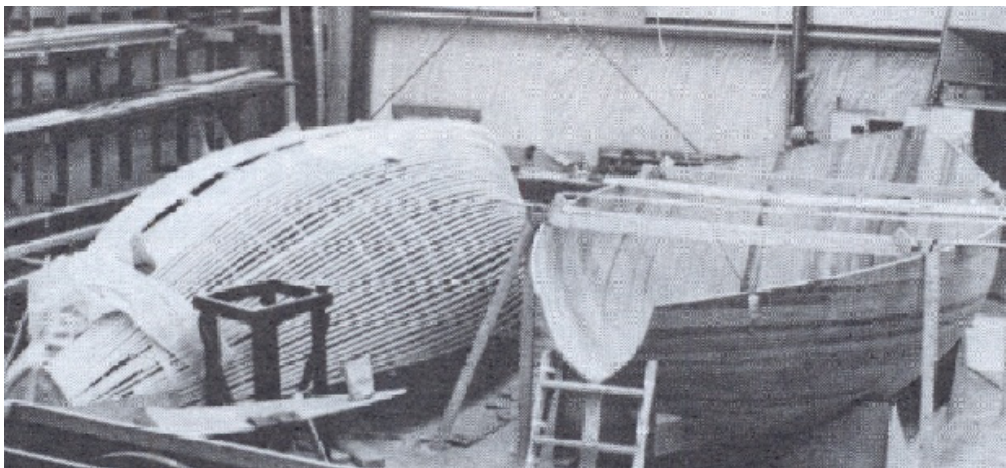
Ristiinlaminoinnissa (cold moulding) rakenne kootaan ohuista viilu- tai vanerikerroksista, jotka liimataan toisiinsa kiinni huoneenlämmössä, vähintään 15 °C. Menetelmässä kerrokset liimataan toisiinsa nähden limittäin jolloin rakenteesta tulee diagonaalisesti riittävän jäykkä. (Broch 1993, 150.)



Kuva 2. Viilukerrosten laminointia (Song Of The Paddle -verkkosivut)

4.1.1 Rakennusmuottimenetelmä

Menetelmässä viilut/vanerit liimataan toisiinsa kiinni pinnan sisäpuolelle rakennetun vahvan rakennusmuotin (kehikon) päälle. Viilukerrokset voidaan liittää rakennusmuottiin muovin kovettumisen ajaksi sinkilöiden avulla, jotka poistetaan muovin kovettuttua. Menetelmässä rakennusmuotti päällystetään kokonaan muovikalvolla tai muulla vastaavalla materiaalilla, jotta itse rakenne ei liimaudu muottiin kiinni. Menetelmä soveltuu erittäin hyvin suurempiin sarjoihin, joissa tarkoituksena on valmistaa monta samanlaista venettä. Yhtä ainoaa runkoa varten ei muottikehikkoa kannata taloudellisista syistä rakentaa. Rakennusmuottimenetelmässä kaikki sisustus runkoon tehdään vasta sitten, kun runko on valmis ja irrotettu muotin päältä. (Broch 1993, 150 - 153.)

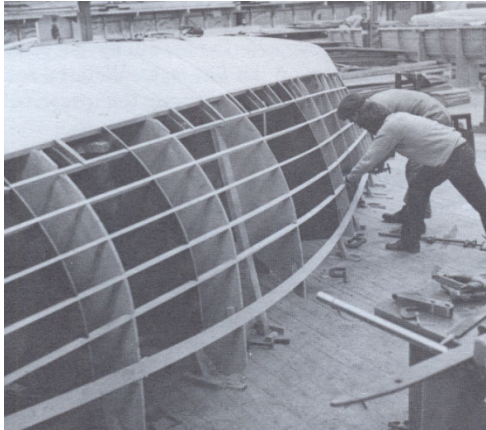


Kuva 3. Ristiinlaminoitu runko muotista irroitettuna (Gougeons 1985)

4.1.2 Rimakaarimenetelmä

Rimakaarimenetelmä eroaa rimalaudoitus- ja rakennusmuottimenetelmästä rasi- tusten jakamisen suhteen huomattavasti. Edellä mainituissa menetelmissä runko on paljolti itsekantava, eli laudoitus ottaa vastaan kaikki runkoon kohdistuvat rasitukset, koska erillisiä poikittaisjäykkäjiä ei ole ollenkaan tai niitä on vain muutama. Rimakaarimenetelmässä runko rakennetaan kevytrakenteisista kaarista ja pitkittäisistä listoista kootun ”puurangan” päälle, joka jakaa runkoon tulevat rasitukset tasaisesti. Tällä menetelmällä saavutetaan paras mahdollinen alhaisen painon ja suuren lujuuden

yhdistelmä. Menetelmässä pitkittäiset rimat upotetaan ohuesta vanerista tehtyihin kaariin, jotka yhdessä muodostavat rasitukset jakavan kehikon, johon pinta laminoidaan kiinni. Tästä johtuen menetelmässä ei käytetä erillisiä mallikaaria. Kehikon päälle liimataan 4-6 viilukerrosta diagonaalisesti. Menetelmän huonona puolena voidaan pitää, kaarien ja listojen (=kehikon) viemää tilaa rungon sisäpuolelta. (Broch 1993, 153-154.)



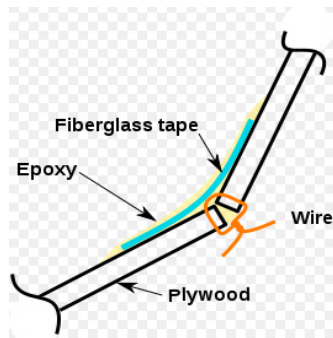
Kuva 4. Rimakaarimenetelmän puurangan kasaus (Gougeons 1985)

4.2 Rimalaudoitusmenetelmä

Rimalaudoitusmenetelmä on paljon käytetty rakennusmenetelmä veneenrakennuksessa. Rungon jäykistys tapahtuu laminoimalla ensimmäisen rimakerroksen päälle 2-3 viilu- tai vanerikerrosta diagonaalisesti. Laminoitavien viilu-/vanerikerrosten määrä on riippuvainen runkoon tulevien poikittaisjäykistäjien, laipioden, kaarien tai pohjatukkien, lukumäärästä ja sijoituksesta. Kevyemmän rakenteen tarvitsemissa kohteissa, kuten kevytveneissä ja kajakeissa, voidaan rimojen päälle laminoitavat viilut/vanerit korvata ohuella lasikuitukudoksella. Lasikuitukudoksella vahvistetuilla rakenteilla ei kuitenkaan saavuteta yhtä jäykkää rakennetta kuin esimerkiksi vanerilla laminoiduilla. Erona rakennusmuottimenetelmään on se, että runko rakennetaan muottina toimivien poikittaislaipioden päälle, jotka jäävät oleelliseksi osaksi runkoa. Laipioita ei ole yleensä kuitenkaan riittävästi, ja siksi laipioden väliin tarvitaan lisäksi mallikaaria, jotka poistetaan sen jälkeen, kun runko on valmis. Kuten rakennusmuottimenetelmässä, sisustusta voidaan alkaa asentaa vasta rungon valmistumisen jälkeen. (Broch 1993, 153.)

4.3 Stich and Glue -menetelmä

Stich and Glue on rakennusmenetelmänä äärimmäisen yksinkertainen. Menetelmän ideana on ”sitoa” rakenteessa olevat vanerilevyt toisiinsa esimerkiksi rautalangalla nippusiteillä tai jopa ilmastointiteipillä. Yhteen sidotun rakenteen paneelit laminoidaan yhteen yleensä lasikuitu-epoksilaminaatilla, jolla saavutetaan erittäin luja liitos. (Boat Builder verkkosivut)



Kuva 5. Esimerkkikuva Stich and Glue -liitoksesta (Wikipedia-verkkosivut)



Kuva 6. Stich and Glue -menetelmällä rakennettu runko (Wikipedia-verkkosivut)

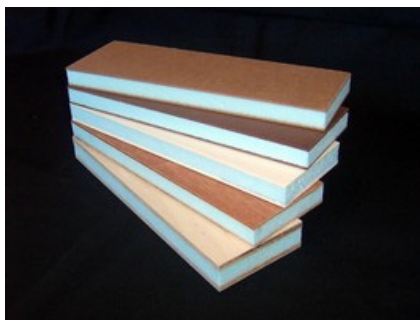
Rakenteen suunnittelussa on otettava huomioon, että rakenteessa voidaan käyttää vain yhteen suuntaan kaarevia paneeleja, kuten alumiiniveneissä. Rakennusmenetelmässä

ei tarvita varsinaista rakennusmuottia, vaan runko rakennetaan muutaman mallikaaren päälle. Menetelmän käyttö onkin yleisintä amatöörirakentajien keskuudessa sen helppouden ja työkalujen vähäisen tarpeen vuoksi.

4.4 Vaahtoydin-viilurakenne

Vaahtoytimelle rakennetut rakenteet ovat erittäin yleisesti käytettyjä rakenteita. Vaahtoytimellä ja pinnalta viilutetulla rakenteella saavutetaan ominaisuuksia, joiden kanssa mitkään muut puukomposiittirakenteet eivät pysty kilpailemaan. Esimerkiksi rakenteen paino on aivan eri luokkaa kuin muilla puukomposiittirakenteilla, joilla saavutetaan puurakenteen ulkonäkö. Edellä mainitusta syystä valveutuneet ja optimaalista suorituskkyä tavoittelevat veneenrakentajat, kuten Baltic Yacht, käyttävät kyseistä rakennetta veneiden sisustuksissa. Näin meneteltynä saavutetaan etenkin purjeveneille tyypillinen arvokkaan näköinen jalopuinen ulkonäkö rakenteen painon ollessa murto-osa massiivipuiseen rakenteeseen verrattuna. Toinen merkittävä näkökanta on rakenteen ekologisuus, joka puhuu kyseisen rakennemenetelmän puolesta. Kyseisellä menetelmällä varsinaista puumateriaalia, yleisesti harvinaista, jos ei jopa uhanalaista, kuluu huomattavasti pienempiä määriä.

Edellä mainittuja rakenteita käytetään yleisesti myös erilaisissa sisustuskappaleissa ja julkisten tilojen sisustuspaneelissa tuomaan arvokasta ulkonäköä. Veneiden kantavissa rakenteissa mainittua rakennetta käytetään kuitenkin erittäin vähän. Syynä tähän on rakenteellisissa osissa tarvittava kuoriosan viilupaksuus tarvittavien mekaanisten ominaisuuksien saavuttamiseksi, jolloin rakenteesta tulee helposti huomattavasti painavampi, kuin jos kuorena käytettäisiin lujitemuovia. Joitakin yksittäisiä veneitä on kuitenkin rakennettu vaahtoytimelle, jonka pintaan on ristiinlaminoitu useita viilukerroksia.



Kuva 7. Viilutettu vaahtoydin (ThomasNet-verkkosivut)

4.5 Muita rakenteita

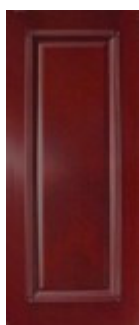
Yleisesti puukomposiiteiksi luokiteltuja rakenteita on lukemattomia, sillä erilaisissa rakenteissa paikallisestikin käytetyt lujitteet tai eri suuntaan laminoidut massiivipuu-, viilu- tai vanerikerrokset tekevät rakenteesta jo komposiittirakenteen ja ovat teknisesti tarkasteltuna mainitsemieni rakenteiden sovelluksia. Seuraavassa on esitetty joitakin käytettyjä puukomposiittirakenteiden sovelluksia.

4.5.1 Paikallisesti lujitetut rakenteet

Paikallisesti lujitettuja rakenteita on yhtä monia kuin niitä rakentavia ihmisiä. Joissakin puurakenteissa käytetään yleisesti lujitteita jakamaan kuormia erityisen rasituksen jakamiseksi. Yleisiä käyttökohteita mainitsemalleni lujitteiden paikalliselle käytölle ovat esimerkiksi mastot, puomit ja perinteisten painokaarien korvaavat lujitteet. Käytetyt lujitteet ovat täysin sovelluksesta riippuvaisia ja haluttujen ominaisuuksien mukaan valittuja. Esimerkiksi perinteisten painokaarien sijaan käytetyllä lujitekerroksella laitalaudoituksen välissä on huomattu olevan rakennetta jäykistävä vaikutus. Tätä suhteellisen harvinaista menetelmää kutsutaan ”cats”-menetelmäksi.

4.5.2 Sisustukselliset rakenteet

Myös muita puukomposiiteiksi luokiteltavia rakenteita käytetään yleisesti etenkin huonekaluteollisuudessa. Esimerkiksi kummaltakin puolelta viilutettu MDF-levy on yleisesti käytössä oleva tapa rakentaa ulkonäöltään jalopuinen, mutta kuitenkin huomattavasti halvempi rakenne kuin massiivipuusta tehtynä.



Kuva 8. Huonekaluissa käytetty viilutettu MDF-levy (Hangzhou Fushidi Decoration Co:n verkkosivut)

4.6 Lujitemuovirakenteet

Seuraavaksi käsitellään lujitemuovirakenteiden rakennusmenetelmiä vain pääpiirteittäin menetelmien yleispiirteiden selvittämiseksi.

4.6.1 Umpilaminaatti

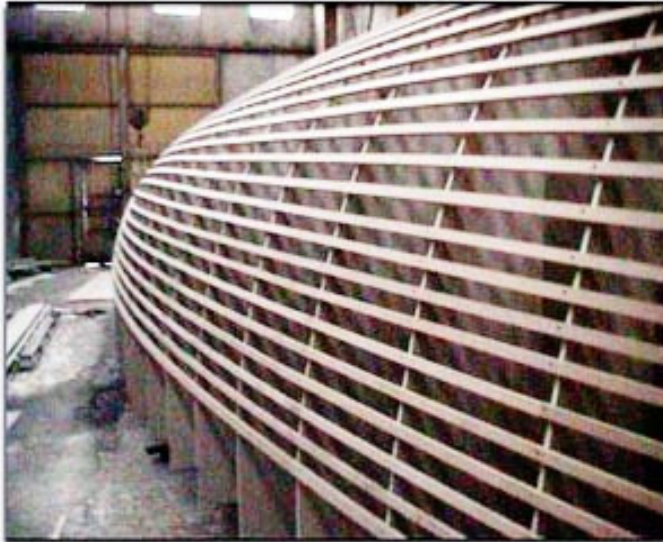
Umpilaminaattirakenteiden runkojen rakentaminen vaatii kunnollisen rakennusmuotin. Tästä syystä umpilaminaattirakenteiden kappaleiden rakentaminen ei ole perusteltua yksittäiskappaleissa suurien muottikustannusten takia. Toisaalta, jos rakennettavia kappaleita on tarvittava määrä soveltuvan muotin rakennuskustannusten kattamiseksi, on runkojen valmistaminen kunnollisesta muotista erittäin nopeaa ja mittatarkkaa.

4.6.2 Kerroslevyrakenteet

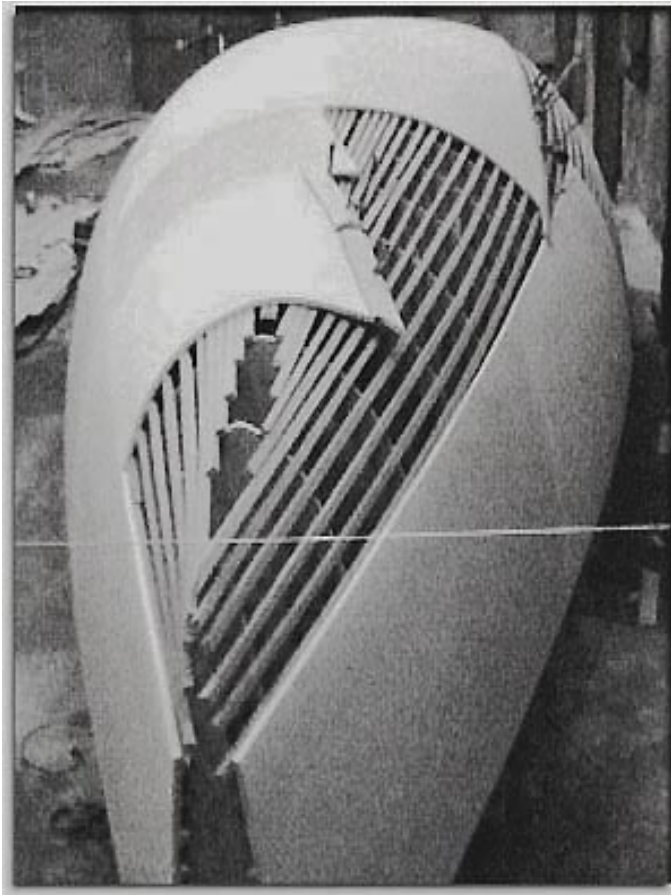
Kerroslevyrakenteisia runkoja voidaan rakentaa kuten umpilaminaattirakenteisia, eli laadukkaasta rakennusmuotista tai vaihtoehtoisesti rimoitettujen mallikaarten päälle (kuva 9), kuten yleisesti onkin tapana etenkin isoimmissa rungoissa, yksittäiskappaleissa sekä erittäin pienissä sarjoissa.

Rimoitettujen mallikaarten päälle rakentaminen ei juuri eroa merkittävimmistä puukomposiittirakenteiden rakennusmenetelmistä. Käytännössä samojen mallikaarten mukaan voisi rakentaa sekä kerroslevyrakenteisen että esimerkiksi rimarakenteisen veneen rungon.

Kerroslevyrakenteinen runko rakennetaan rimoitettujen mallikaarten päällä käytännössä seuraavasti. Mallikaarten päällä kiinnitetään ydinaineena käytetty vaahto esimerkiksi niiteillä tai ruuveilla (kuva 10). Tämän jälkeen rungon ulkokuori laminoidaan sekä hiotaan halutun kerrospaksuuden ja muodon saavuttamiseksi (kuva 11). Ulkopuolelta laminoitu runko irrotetaan mallikaarista ja käännetään ympäri, minkä jälkeen rakenteen sisäkuori laminoidaan (kuva 12).



Kuva 9. Muotti (Amateur Boat Building -verkkosivut)



Kuva 10. Vaahtodynäminen levitys muotin päälle (Amateur Boat Building -verkkosivut)



Kuva11. Rungon ulkokuoren laminointi (Amateur Boat Building -verkkosivut)



Kuva 12. Rungon sisäkuoren laminointi (Amateur Boat Building -verkkosivut)

5 RAKENNUSMENETELMÄN EDUT JA HAITAT VENEENRAKENNUKSESSA

Veneenrakennuksessa tärkeimmät rakenteelta vaaditut ominaisuudet ovat jäykkyys, keveys sekä riippumattomuus kosteuden vaihteluista. Epoksien käyttö osana rakennetta antaa puurakenteelle kaivatun suojan kosteutta vastaan epoksien antaessa puulle sitä suojaavan kosteutta eristävän kerroksen. Rimoista ja/tai diagonaalisesti laminoiduissa rakenteissa olennaista on myös käytetyn matriisimuovin antama kerrosten välinen leikkauslujuus. Tästä syystä epoksien käyttö on erittäin perusteltua laminoitaessa puukerroksia toisiinsa.

Huomioitavaa on myös mahdollisuus rakentaa lujitemuovirunkojen valmistamisen vaatima muotti käyttäen puukomposiittista runkoa lestinä. Näin menetellen voidaan jo valmista runkoa testata protokappaleen omaisesti ennen varsinaisen sarjatuotantoon suunnitellun kappaleen rungon muotin valmistamista. Näin meneteltynä voidaan mahdolliset suunnitelmalliset ongelmakohdat vielä korjata ennen huomattavasti kalliimman muotin rakentamista.

5.1 Sarjatuotantomahdollisuudet

Puukomposiittirakenteisten veneiden sarjatuotantomahdollisuudet ovat käytännössä vastaavat kuin perinteistenkin puuveneiden. Tämä johtuu suurelta osin siitä, että perus- valmistusmenetelmät ovat pääasiassa vastaavat. Materiaalivalinnoissa ja joissakin työskentelyvaiheissa on luonnollisesti enemmän yhteneväisyyksiä nykyaikaisten lujitemuoviveneiden valmistukseen kuin puuvenetuotantoon.

1950-luvulla puuveneitä tehtiin sarjoissa muun muassa Lindströmin veistämöllä Porvoon Kråkössä ja Suomen Kalastuksen veistämöllä Loviisassa. (Puuveneveistäjillä yhteinen kehittämishanke)

Periaatteessa jonkin asteinen sarjatuotanto on mahdollista, mutta siitä saatavat hyödyt ovat kyseenalaisia. Nykyään moni puuveneiden omistaja haluaa juuri yksilöllisen veneen, joka on valmistettu käsityönä juuri ostajan erityistoiveet huomioon ottaen. Jos puuveneveistämisessä siirryttäisiin sarjatuotantoon, se puuveneiden omistajaryhmä,

joka on valmis maksamaan yksilöllisestä puuveneestä, siirtyisi tuskin sarjoissa valmistettuihin venemalleihin. Toisaalta sarjoissa tuotetut kohtuuhintaiset puurakenteiset veneet, joilla olisi vastaava suorituskyky ja käytön helppous kuin lujitemuoviveneillä, saattaisivat kiinnostaa suurtakin asiakaskuntaa, jos veneiden hinta olisi kilpailukykyinen muista materiaaleista valmistettujen veneiden kanssa.

Mielestäni puukomposiittirakenteiset veneet sopisivat ennemminkin juuri yksittäistuotantoon henkilöille, jotka arvostavat yksilöllistä puuveneeseen ulkonäköä sekä kuitenkin käytön ja huollon helppoutta. Tuloksena olisi puuvene, joka olisi suorituskyvyltään lujitemuoviveneiden kanssa erittäin kilpailukykyinen, ”puuveneeseen näköinen muovivene”.

5.2 Mekaaniset ominaisuudet

Puukomposiittien mekaanisista ominaisuuksista on suhteellisen vähän saatavilla tutkimustietoa. Vertaileva tutkimus puukomposiitti-, puu-, lujitemuovi- sekä lujitemuovisen sandwich-rakenteen kesken on erittäin haastavaa, sillä jokaisella rakenteella on omat etunsa. Suuremmissa sarjoissa valmistettuna on umpilaminaattinen lujitemuovirakenne ehdottomasti mainituista rakenteista kustannustehokkain, mutta toisaalta sen mekaaniset ominaisuudet painoon suhteutettuna eivät ole kovin kilpailukykyisiä kerroslevy- tai joihinkin puukomposiittirakenteisiin verrattuna. Vaahto- tai kennoytimen ympärille rakennetut rakenteet ovat ehdottomasti rakenteen optimoitujen mekaanisten ominaisuuksien ja painon kannalta kaikkein tehokkain rakenne, mutta toisaalta rakenteessa käytetyt materiaalit sekä rakenteen valmistuskustannukset ovat myös korkeimmat. Sekä puu- että puukomposiittirakenteissa haluttaessa saavutettava esteettisyys, puinen ulkonäkö, on taas näiden rakenteiden suuri vahvuus. Kuten kaikessa, on rakennetta vertailtaessa valittava määräävät ominaisuudet ja niiden valintojen kautta oltava valmis kompromisseihin muiden ominaisuuksien suhteen.

Ruotsissa, Kungl Tekniska Högskolanissa, tehdyssä tutkimuksessa tutkittiin lasikuitu- vinyyliesterilaminaatin ja rima-epoksirakenteiden eroa kanoottien ja kajakkien rakentamisessa. Koska tutkimuksen pohjana on käytetty kanoottien sekä kajakkien rakennetta, on tutkimus todellisuutta hiukan vääristävä, sillä pienissä ja kevyissä

veneissä on rakenteen jäykkyys huomattavasti määräävämpi tekijä kuin muut mekaaniset ominaisuudet. Näissä tapauksissa rakenteen jäykkyys määräytyy paksuuden mukaan ja umpilaminaattirakenteessa rakenne, jonka tiheys on suuri, nostaa kappaleen massaa mainitusta syystä huomattavasti.

Taulukko 2. Materiaalidata lasikuitu-vinyyliesterilaminaatille, kuitupitoisuus 26,7 % (vol).

Lasikuitu-vinyyliesteri laminaatti	Veto	4-pistetaivutus
E-modulus	13,7 GPa	12,8 GPa
s	206 MPa	360 MPa
e	2,17 %	3,85 %
r	1600 kg/m ³	1600 kg/m ³

(Thunvik & Åkerlund)

Seuraavassa taulukossa esitetään kertoimet, joiden avulla voidaan määrittää lasikuitu-vinyyliesterilaminaatin paino suhteessa testissä käytettyyn rima-epoksirakenteeseen. Testissä käytetyn rima-epoksilaminaatin tiheys on 460 kg/m³. Tutkimuksessa silmiinpistävää on rima-epoksilaminaatin taivutusjäykkyys kuitusuunnassa; kyseisessä tilanteessa lasikuitu-vinyyliesterilaminaatti tulisi 70 kertaa niin painavaksi kuin rima-epoksilaminaatti saavuttaakseen saman jäykkyyden. Ainoat mekaaniset ominaisuudet, joilla lasikuitu-vinyyliesterilaminaatti on painoon suhteutettuna tehokkaampaa, ovat vetolujuus sekä vetojäykkyys ja nämäkin vain tilanteessa, kun rima-epoksirakennetta rasietaan puun kuitusuuntaa kohti.

Tutkimuksesta käy selvästi ilmi se, että varsinkin pienissä veneissä, joissa rakenteen jäykkyys on määräävin tekijä rungon mitoituksessa, ovat puukomposiitit erittäin varteenotettava rakenne. On silti otettava huomioon, että vertailussa käytetyllä lasikuitu-vinyyliesterilaminaatilla on suhteellisen pieni kuitupitoisuus (26,7 %). Kuitupitoisuutta pystyttäisiin selvästi nostamaan käyttämällä alipaineavusteisia

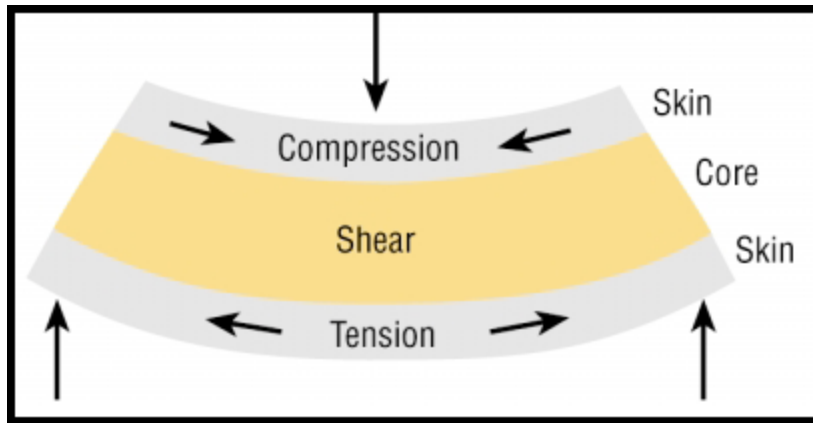
rakennusmenetelmiä, jolloin kyseisen laminaatin ominaisuudet parantuisivat huomattavastikin.

Taulukko 3. Mekaanisten lujuusominaisuuksien massakertoimet lasikuitu-
vinyyliesterilaminaatin ja rimaepoksirakenteen välillä.

	Vetolujuus	Vetojäykkyys	Taivutuslujuus	Taivutusjäykkyys
Puun kuitusuunnassa	2	3	7	70
puun kuitusuunta kohti	0,5	0,5	1,5	20

(Thunvik & Åkerlund)

Vertailtaessa umpilaminaatti-, kerroslevy- ja puukomposiittirakenteita osoittautuvat erityisen merkittäviksi käytettävän ydinaineen mekaaniset ominaisuudet. Puukomposiittirakenteissa, joissa pinnalla käytetään erityistä lujitekerrosta, tulee itse puurakenteista ydintä tutkia kuten kerroslevyrakenteissa käytettyjä ydinaineita. Kuten kuvasta 13 nähdään, ydinainerakenteissa suhteellisen rakennepaksuuden kasvaessa kasvavat myös ydinaineen ympärillä olevaan rakennekerrokseen kohdistuvat rasitukset. Oman haasteensa ydinaineelle tuo juuri rakennepaksuuden mukanaan tuoma rasitusten epätasaisuus, sillä taivuttavan voiman puolella rakenteeseen kohdistuu puristusta ja toisaalta taivuttavan voiman vastapuolella jännitystä. Tästä syystä on ydinaineella oltava hyvät leikkauslujuusominaisuudet rasituksia kestävässä rakenteen saamiseksi. Kevyitä ydinaineita käyttämällä saavutetaan erittäin kevyitä, mutta silti jäykkiä rakenteita. Juuri tästä syystä edellä mainitussa tutkimuksessa saavutetut tulokset eivät ole testissä käytettyjen veneiden koon vuoksi täysin objektiivisia. (SP Systems-verkkosivut)



13. Kerrosrakenteeseen kohdistuvat rasitukset (SP Systems-verkkosivut)

5.3 Esteettiset ominaisuudet

Osa epokseista on täysin läpikuultavia. Näitä epokseja käytettäessä saavutetaan rakenteena käytetyn materiaalin oma ulkonäkö myös valmiissa kappaleessa. Myös puurakenteisen rakenteen jäykistäminen lasikuitu- epoksilaminaatilla antaa lähes lakkamaisen pinnan kappaleelle epoksin kyllästäessä lasikuitukudoksen. Lopputuloksesta ei pysty kuin aivan läheltä huomaamaan, että rakenteessa on lasikuitukudos.



Kuva 14. Rima-epoksirakenteinen kajakki (Kajakkikäivät-verkkosivut)

5.4 Rakenteiden korjausmenetelmät

Koska tutkimani rakenteet ovat veneissä käytettyjä rakenteita, on mahdollisten karilleajojen ja rantautumisten yhteydessä tulevien vaurioiden korjaaminen myös otettava huomioon rakenteita vertailtaessa. Käytännössä harvan rakenteen korjauksen kautta saavutetaan identtiset lujuusominaisuudet alkuperäisen ehjän rakenteen kanssa. Poikkeuksena on esimerkiksi paikkahitsattu teräsvene tai joissakin tapauksissa umpilaminaattirakenteinen vene. Tästä syystä perehdyn enemmän korjauksen vaativuuteen yleisellä tasolla.

5.4.1 Lujitemuoviveneiden korjaus

Lujitemuoviveneiden korjauksessa oleelliset huomioon otettavat asiat ovat, onko rakenne kerrosrakenne vai umpilaminaattinen, sekä rakenteessa käytetyt lujitekuidut. Umpilaminaattisen rakenteen korjaus on suhteellisen yksinkertainen toimenpide: vaurioitunut kohta rajataan ja hiotaan auki, minkä jälkeen vaurioitunut kohta laminoidaan mieluiten vastaavalla matriisimuovin ja kuidun yhdistelmällä kuin alkuperäinen rakennekin on. Edellä mainittu toimenpide soveltuu kuitenkin pääasiassa vain rakenteille, joissa lujitteena on käytetty lasikuitua.

Hiilikuiturakenteiden ollessa kyseessä rakenteen lujuus perustuu pitkiin kuituihin. Jo pienikin reikä hiilikuituisessa rakenteessa heikentää rakennetta oleellisesti. Toisaalta hiilikuituja ei käytetä käytännössä lähes koskaan umpilaminaattisissa rakenteissa.

Kerroslevyrakenteiden korjaus on hiukan umpilaminaattikorjausta vaativampaa. Kerroslevyrakenteen korjauksessa tulee vaurioituneen alueen kohdalta kuoria (hioa) vaurioitunut laminaatti pois, minkä jälkeen vielä vauriokohdan ydinaineena käytetty vaahto tai muu käytetty ydinaine tulee lähes poikkeuksetta poistaa ja korvata uudella ydinaineella ennen varsinaista korjauslaminointia, joka muuten tapahtuu kuten umpilaminaattirakenteissa. Kerroslevyrakenteissa saattaa laminaatin läpi päässyt vesi/kosteus päästä liikkumaan huomattavan helposti ydinaineessa, mistä johtuen kerroslevyrakenteisten runkojen vauriokorjaukseen kuuluu yleisesti myös jonkun tasoinen kuivaus sekä rakenteen huuhtelu makealla vedellä vaurion laajuudesta riippuen.

5.4.2 Puukomposiittirakenteiden korjaus

Puukomposiittirakenteiden vauriot eivät ole erityisen helppoja korjattavia. Tämä johtuu siitä, että puu orgaanisena materiaalina imee kosteutta itseensä ja kosteudesta aiheutuvat muodonmuutokset voivat aiheuttaa vakaviakin mekaanisten ominaisuuksien heikkenemiä rakenteelle esteettisistä vahingoista puhumattakaan.

Yleisellä tasolla rimarakenteiden runkojen korjaus on kuitenkin suhteellisen yksinkertainen toimenpide, jos rakenne on alun perin asiallisesti rakennettu. Koska puukomposiittirakenteissa on puurakenteen (myös yksittäisten rimojen) kotelointi erittäin tärkeää, on rimarakenne oikein tehtynä täynnä koteloituja rimoja, joiden välillä ei kosteuden tulisi liikkua. Tästä johtuen vaurioiden tulisi muuten ehjässä rakenteessa keskittyä vain rimoihin, jotka ovat varsinaisessa vauriokohdassa.

Edellä mainitun tapaisissa vaurioissa vaurioitunut rima poistetaan esimerkiksi jyrsimällä, minkä jälkeen uusi rima sovitetaan ja liimataan paikoilleen ja laminoidaan yli. Tällaisella korjauksella ei saavuteta vastaavaa mekaanista lujuutta kuin ehjällä rakenteella, ja korjatun rakenteen mekaanisten ominaisuuksien heikkenemät ovat huomattavasti suurempia kuin esimerkiksi umpilaminaattirakenteissa.

Ristiin laminoiduissa rakenteissa korjaaminen tapahtuu usein kuten lasikuituisten umpilaminaattisten rakenteiden korjaus, jolloin vaurioitunut puu joudutaan poistamaan, ja yleisesti vauriokohta korjataan lasikuidulla ja epoksilla. Mekaaniset heikkenemät ovat huomattavia.

Kummassakin puukomposiittirakenteen korjaustavassa on rakenteen esteettisten ominaisuuksien huomattava heikentyminen erittäin todennäköistä, ja tästä syystä useat korjatut rakenteet maalataankin korjauksen jälkeen.

5.5 Kustannusvertailut

Kustannuksiin liittyvät vertailut ovat valmistusaikojen kannalta omien kokemuksieni sekä veneteollisuudesta saatujen arvioiden kautta tehtyjä, joten kyseessä on vain suuntaa antavat karkeat arviot valmistukseen kuluvasta ajasta. Materiaalivertailu on

ainoastaan umpilaminaattisen lujitemuovikappaleen sekä rima-epoksirakenteisen kappaleen suhde. Kerroslevyrakenteisia rakenteita erilaisilla lujitekuiduilla ja ydinaineilla varustettuna on niin suuri määrä, että niiden ottaminen mukaan vertailuun ei olisi mielestäni järkevää, koska kerroslevyrakenteilla saavutetut ominaisuudet kilpailevat lujuus-paino-hintasuhteillaan aivan eri luokassa muiden rakenteiden kanssa.

5.5.1 Umpilaminaatin ja rimaepoksin kustannusvertailu

Käsittelimäni materiaalikustannukset perustuvat lujitemuovituotteiden osalta Terpol Oy:n sekä puumateriaalin osalta Fiskarsin Laatupuu Oy:n hintoihin. Hinnat olen laskenut suurimpien tarjolla olevien pakkauskokojen mukaisesti, jotta laskennasta aiheutuvat virheet olisivat mahdollisimman pieniä.

Rakennehintojen pohjana olen käyttänyt Thunvikin ja Åkerlundin tekemästä tutkimuksesta saatuja mekaanisten lujuusarvojen kertoimia, joiden avulla olen määrittänyt tarvittavan vinyyliesterilaminaatin painon suhteen tutkimuksessa käytetyn rima-epoksilaminaatin painoon. Laskut laskin 1 m² kokoiselle alalle 10 mm paksuiselle rimaepoksirakenteelle. Todellisia lujuuslaskelmia en ole laskenut kyseisille laminaateille, vaan laskelmat ovatkin enemmän suuntaa antavia. Laskuissa käytetyt arvot eivät perustu todellisiin lujitekerroksiin vaan laskennallisesti suhteutettuun kuitupitoisuuteen.

Määritin haluamani rima-epoksilaminaatin paksuuden, joka oli 10 mm, ja valitsin vertailtavaksi lujuudeksi taivutuslujuuden kohtisuoraan puun syitä kohti, jolloin Thunvikin ja Åkerlundin tutkimuksen mukainen kerroin oli 1,5. Valitsin juuri kyseisen lujuusarvon edellä mainitun tutkimuksen tuloksista siitä syystä, että taivutuslujuus on yksi määräävimmistä lujuuksista pienemmissä veneissä ja kanooteissa sekä siitä syystä, että kertoimella 1,5 ovat tutkittavat rakenteet tutkimuksellisesti lähempänä toisiaan kuin esimerkiksi taulukossa myös esiintyvän kertoimen 70 myötä.

Taulukko 4. Laskennassa käytettyjen materiaalien hinnat

Vinyyliesteri	Crystic VE-676	10	€/ kg
Lasikuitu emulsiosidotu	Scott Bader ECSM 450	4	€/ kg
Epoksi	SP106	17	€/ kg
Lasikuitukudoa	Twilli 165 g/m ²	5	€/ m ²
Kuusi		590	€/ m ²
Hinnat: Terpol Oy, Fiskarsin Laatupuu Oy			

Kuten seuraavasta taulukosta 5 voidaan huomata, saadaan Thunvikin ja Åkerlundin tutkimuksen pohjalta taivutuslujuudeltaan samanlaisten rakenteiden painoeroksi 33 %, rakenteiden hintaero on jo kaksinkertainen (200 %). Laskujen pohjalta saatu 33 %:n ero rakenteiden laskennallisessa massassa on niin suuri, että jo pienimmissäkin veneissä tulee rungon painoero olemaan huomattava.

Taulukko 5, Laskettujen laminaattien arvot

Laskennallinen laminaatti 1000x1000x10mm	Kuitupitoisuus massa [%]	Ominaispaino [kg / m ³]	Laminaatin paino [kg]	Laminaatin hintaa [€]
Vinyyliesteri- lasikuitulaminaatti (umpila- minaatti)	33	1600	6,9	54
Rima-epoksilaminaatti (puu 8mm + 2x lasikuituku- dos)	33	460	4,6	27

5.5.2 Valmistusajat

Opinnäytetyöni osaksi suunniteltu haastattelukirje veneen- sekä venemuottien rakentajille ei tuottanut kuin kaksi vastausta 36:sta lähetetystä haastattelukirjeestä. Tästä syystä en pysty käsittelemään muotin, jigien eikä rungon rakentamisesta aiheutuvia työkuulumuksia tutkimuksellisesti. Runkojen rakentaminen mainitulla valmistusmenetelmällä voidaan kuitenkin laittaa karkeaan järjestykseen, minkä avulla voidaan vertailla eri menetelmien valmistusaikoja runkoa kohti. Valmistusajat perustuvat omakohtaisiin kokemuksiin ja arvioihin, eivätkä ne siksi ole absoluuttisia totuuksia. Valmistusajat ovat muutenkin erittäin rakentajasta riippuvaisia, joten käsittelen rakennusaikoja kokemuseräisillä kertoimilla (taulukko 6). Valmistusajat ovat arvioituja valmistusaikoja avolaminoimalla.

Taulukko 6. Valmistusaikakertoimet eri valmistusmenetelmille

Muotissa rakennettuna		Aikakerroin	1kpl	2kpl	3kpl	5kpl
Umpilaminaatti		1	7	8	9	11
Kerroslevy		1	7	8	9	11
Mallikaarien päälle rakennettuna		Aikakerroin	1kpl	2kpl	3kpl	5kpl
Kerroslevy- lujitemuovi		3	3,5	7	10,5	17,5
Rimarakenteinen		3	3,5	7	10,5	17,5
Ristiinlaminoitu		4	4,5	9	13,5	22,5
Muotinvalmistus	6					
Mallikaarien kaasaaminen	0,5					

Arvioimieni aikakertoimien pohjalta pystytään toteamaan, että riippuen valmistusmenetelmästä muotissa rakentaminen tulee aikaan suhteutettuna kannattavammaksi jo 2-3 kappaleen tienoilla. Toisaalta mallikaarien päälle rakennettaessa ei lujitemuovirakenteisen ja puukomposiittirakenteisen rungon välillä ole huomattavaa ajallista eroa. Puurakenteisessa veneen rungossa suurin osa ajasta kuluu puukappaleiden sovittamiseen ja hiomiseen, kun taas lujitemuovisessa halutun muodon hiomisen vaatimaan aikaan.

On myös huomioitava, että mallikaarien päälle rakennettuja kappaleita pystytään mahdollisten koeajojen ja muiden testien jälkeen käyttämään lestinä mahdolliselle muotille, jolloin mahdolliset rungossa havaitut suunnitteluvirheet tai muut vastaavat pystytään korjaamaan helpommin ja halvemmalla kuin uuden muotin valmistamisen kautta.

6 Johtopäätökset

Millä tahansa rakentamiseen ja rakenteisiin liittyvillä alalla on aina kyse kompromisseista. Tuotteeseen halutut ominaisuudet määrittelevät myös tuotteeseen tulevat puutteet. Yhtä ja ainoaa oikeaa tapaa valmistaa mitään kappaletta ei ole, ja tästä johtuen perustelut käytettyjen materiaalien valinnalle antaa useimmiten ostava asiakas tai niihin vaikuttavat kappaleen valmistajan omat mieltymykset ja taidot tietyn materiaalin käsittelystä.

Niin lujitemuovisilla rakenteilla kuin myös erilaisilla puurakenteilla on erittäin paljon huomattavia yksilöllisiä ominaisuuksia, joita taas toisilla ei välttämättä ole lainkaan. Nämä voivat liittyä mekaanisiin lujuuksiin, painoon, hintaan, esteettisyyteen, valmistukseen kuluvaan aikaan tai olla näiden suhdelukuja, joiden mukaan tulee jokaisen tuotettavan kappaleen tarpeen mukaisesti määrittää halutut ominaisuudet sekä niistä aiheutuvat ominaisuuksien heikkenemät ja tuotettavan kappaleen hinta.

Erilaiset puukomposiittirakenteet ovat varsin kilpailukykyisiä umpilaminaattisten lujitemuovirakenteisten sekä puurakenteisten kappaleiden kanssa niin mekaanisilta ominaisuuksiltaan kuin myös materiaali- ja tuotantokustannuksiltaan. Kerroslevyrakenteisiin verrattuna ei puukomposiittirakenteilla pystytä mitenkään saavuttamaan vastaavia mekaanisia ominaisuuksia sekä painon ja haluttujen rasitusten jakamiseen tarvittavaa lujitekuitusuuntien optimointia.

Toisaalta kustannuksien ja kompromissien kautta tutkittaessa voidaan tietyissä tilanteissa todeta puukomposiittirakenteilla saavutettavan kappaleelle tarvittavat mekaaniset ominaisuudet, jolloin niiden käyttö voi olla perusteltua jopa kerroslevyrakenteisiin lujitemuoviveneisiin verrattuna. Aina haluttaessa kappaleelle äärimmäisiä mekaanisia ominaisuuksia on kuitenkin ainoa todellinen vaihtoehto lujitettu kerroslevyrakenne.

Puhuttaessa veneistä valmistettavana kappaleena voidaan myös todeta, että rungon massa on vain murto-osa valmiin heloitettun veneen massasta. Tätä kautta asiaa pohdittaessa ei rungon massan pienillä eroilla ole välttämättä niin suurta vaikutusta

koko veneen massaan, että olisi muissa kuin ääritapauksissa järkevää optimoida pelkkää rungon massaa. Kuitenkin nykyaikaisissa veneissä on sisus järjestelmällisesti jalopuuta, osassa toisaalta kerroslevyrakenteisena painooptimoituja. Tutkimuksellisesti voidaan siis todeta, että sisustuksen massaa voidaan pitää vakiona runkorakenteesta riippumatta. Tämän näkökannan perusteella on rakennettavan veneen käyttötarkoituksen mukaan mietittävä veneen rungon massa ja hinta ja mekaanisten ominaisuuksien kautta rungon optimoinnilla saavutettava todellinen hyöty.

Tärkeimpinä puukomposiittien puolestapuhujina voisin pitää perinteisen puuveneen näköisiä veneitä, joiden mekaaniset sekä huoltamiseen liittyvät ominaisuudet olisivat lähempänä lujitemuovisia veneitä kuin itse puuveneit. Uskoisin kyseisen tyyllisillä veneillä olevan kysyntää venemarkkinoilla juuri veneiden helppohoitoisuuden sekä yksilöllisen ulkonäön ansiosta. Vene on kuitenkin nykyaikana suurimmalle osalle veneiden omistajista vapaa-aikaan liittyvä harrastus, joten veneen omistajan tulisi tuntea mielihyvää sekä ylpeyttä omistamastaan veneestä. Luultavasti juuri tästä syystä on myös lujitemuovisten yksittäiskappaleina valmistettavien veneiden kysyntä kasvanut viime vuosikymmeninä.

Jotta puuveneid uudelle tulemiselle olisi paikkansa helppohoitoisten sekä suorituskkyisten lujitemuoviveneiden rinnalla, voisin hyvin kuvitella sen tapahtuvan puukomposiittien kautta, jolloin nämä uudenaikaiset puuveneet tuotaisiin useimmilta ominaisuuksiltaan lähemmäksi nykyaikaisia lujitemuoviveneitä. Lujitemuoviveneistä tuttuun sarjatuotantoon ei puukomposiittirakenteisista veneistä kuitenkaan olisi, vaan veneissä säilyisi puuveneistä tuttu yksilöllisyys sekä puuveneid ympärille aikojen saatossa kehittynyt mystiikka.

LÄHDELUETTELO

Kirjallisuuslähteet:

Broch, Ole-Jacob 1993. Puuvene. Saarijärvi: Opetushallitus.

Elolinja, Juha 2002. Lämpökäsitellyn puun ominaisuudet ja lujuus. Opinnäytetyö: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Gougeons 1985. The Gougeon Brothers On Boat Construction. Midland: The Mc Kay Press.

Saarela, Olli 2007. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys Ry.

Internet-lähteet:

Amateur Boat Building verkkosivut. Saatavissa:

http://www.amateurboatbuilding.com/articles/howto/foam_sandwich/index.html, [viitattu 18.04.2011]

Boat Builder verkkosivut. Saatavissa:

<http://www.boatbuilder.org/stitchandglue.htm>, [viitattu 19.04.2011]

Claisse, Peter. verkkosivut. Saatavissa:

<http://www.claisse.info/Wood.htm>, [viitattu 28.02.2011]

Fiskarsin Laatupuu Oy:n verkkosivut. Saatavissa:

<http://www.fiskarslaatupuu.fi/fi/>, [viitattu 12.05.2011]

Hangzhou Fushidi Decoration Co. verkkosivut. Saatavissa:

<http://fushidi.en.made-in-china.com/product/coyJaeZGCmlj/China-Wood-Composite-Interior-Painting-Wood-Veneer-Door-FMA-015-.html>, [viitattu 18.04.2011]

Hempel Oy:n verkkosivut. Saatavissa:

<http://www.hempel.com/internet/inefic.nsf/vHEMPELDOC/810C024442B68117C1256F010024B7D1?OpenDocument>, [viitattu 28.03.2011]

Kajakkikäyvät verkkosivut. Saatavissa: <http://www.kajakki.net/images/051001/PA010164.jpg>, [viitattu, 12.05.2011]

Poliklinikka.fi verkkosivut. Saatavissa:

<http://www.poliklinikka.fi/?page=1497210&id=3031399>, [viitattu 2.4.2011]

PuuProffa verkkosivut. Saatavissa:

http://www.puuproffa.fi/arkisto/viilut_ja_viilutus.php, [viitattu 2.4.2011]

<http://www.puuproffa.fi/arkisto/vanerit.php>, [viitattu 2.4.2011]

Puuveneveistäjillä yhteinen kehittämishanke, Veneenveistäjä 2 verkkoversio. Saatavissa:

<http://www.puuveneveistajat.fi/Lehti/Veneenveistaja2/4.PDF>, [viitattu 28.03.2011]

Song Of The Paddle verkkosivut. Saatavissa:

<http://www.songofthepaddle.co.uk/forum/showthread.php?26817-plywood-strips-for-stripper>
[viitattu 02.05.2011]

SP Systems verkkosivut. Saatavissa:

<http://www.bolton.ac.uk/CODATE/SPGuidetoComposites.pdf>, [viitattu 08.05.2011]

Suomisanakirja verkkosivut. Saatavissa:

<http://suomisanakirja.fi/komposiitti>, [viitattu 28.03.2011]

Terpol Oy:n verkkosivut. Saatavissa:

<http://www.terpol.fi/>, [viitattu 12.05.2011]

ThomasNet verkkosivut. Saatavissa:

<http://news.thomas.net.com/fullstory/Foam-Composite-Panels-weigh-as-little-as-12-oz-sq-ft-524889>, [viitattu 18.04.2011]

Thunvik & Åkerlund, Kungl Tekniska Högskolan 2000, Ett trä/epoxi - laminats konstitutiva egenskaper, Saatavissa: <http://www.thomassondesign.com/doc/woodepoxi.pdf>, [viitattu 04.05.2011]

Wikipedia verkkosivut. Saatavissa:

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:StitchAndGlue.svg>, [viitattu 02.05.2011]

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Canoe_stitch_and_glue.jpg, [viitattu 19.04.2011]

The Woodexplorer verkkosivut. Saatavissa:

<http://www.thewoodexplorer.com/> [viitattu 25.03.2009]